

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.8  
第41卷 第8期

目次

首都重大活动与空气重污染应急减排措施效果对比分析 ..... 钟焱盛, 周颖, 程水源, 王晓琦, 邵玄逸 (3449)

基于天津市在线数据评估 ISORROPIA-II 模式结果及气溶胶 pH 的影响因素 ..... 高洁, 史旭荣, 卫昱婷, 宋少洁, 史国良, 冯银厂 (3458)

餐饮源有机颗粒物排放特征 ..... 李源逵, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭, 胡敏 (3467)

华中地区黄冈市一次重度污染期间 PM<sub>2.5</sub> 中 12 种微量元素特征及来源解析 ..... 陈展乐, 田倩, 毛瑶, 刘威杰, 石明明, 程钺, 胡天鹏, 邢新丽, 祁士华, 胡金旭 (3475)

艾比湖地区气溶胶光学特性分析 ..... 张喆, 丁建丽, 王瑾杰 (3484)

天津市冬季重污染二次有机化学污染特征及 VOCs 对 SOA 生成潜势 ..... 徐虹, 唐邈, 肖致美, 高璟贇, 杨宁, 李立伟, 郑乃源, 陈魁, 邓小文 (3492)

郑州市某城区冬季不同污染水平大气 VOCs 特征及源解析 ..... 李一丹, 尹沙沙, 张瑞芹, 于世杰, 杨健, 张栋 (3500)

长江三角洲 2010~2018 年生物质燃烧中等挥发性有机物 (IVOCs) 排放清单 ..... 朱永慧, 王倩, 黄凌, 殷司佳, 李莉, 王杨君 (3511)

北方常见绿化树种 BVOCs 排放特征及其与光合作用参数的相关性 ..... 许燕, 李双江, 袁相洋, 冯兆忠 (3518)

广州地区秋季不同站点类型地面臭氧变化特征与影响因子 ..... 高平, 庄立跃, 王龙, 陈瑜萍, 闫慧, 沈劲, 范丽雅, 叶代启 (3527)

泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析 ..... 李凯, 刘敏, 梅如波 (3539)

有色冶炼园区道路扬尘中重金属污染特征及健康风险评价 ..... 冯于耀, 史建武, 钟曜谦, 韩新宇, 封银川, 任亮 (3547)

西安市高校校园地表灰尘重金属污染来源解析 ..... 樊馨瑶, 卢新卫, 刘慧敏, 秦青 (3556)

超低排放高湿度气态颗粒物监测方法及燃气电厂实际测试 ..... 胡月琪, 颜旭, 孔川, 张虎, 郭晓东 (3563)

厦门市船舶控制区大气污染物排放清单与污染特征 ..... 王坚, 黄屋, 刘艳英, 陈森阳, 吴艳聪, 何月云, 杨心怡 (3572)

基于交通流的成都市高分辨率机动车排放清单建立 ..... 潘玉瑾, 李媛, 陈军辉, 石嘉诚, 田红, 张季, 周敬, 陈霞, 刘政, 钱骏 (3581)

基于无人机多光谱影像和 OPT-MPP 算法的水质参数反演 ..... 黄昕晰, 应晗婷, 夏凯, 冯海林, 杨根晖, 杜晓晨 (3591)

不同水体分层对沉积物间隙水氮素垂向分布影响: 以三峡水库和小湾水库为例 ..... 刘静思, 朱晓声, 胡子龙, 张思思, 杨正健, 纪道斌, 刘德富 (3601)

城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为 ..... 赵昕, 陈浩, 贾其隆, 沈忱思, 朱弈, 李磊, 聂云汉, 叶建锋 (3612)

上海河道浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素分析 ..... 许志, 陈小华, 沈根祥, 朱英, 钱晓雍, 张心良, 张卫, 胡双庆, 白玉杰 (3621)

过氧化钙 (CaO<sub>2</sub>) 联合生物炭对河道底泥的修复 ..... 李雨平, 姜莹莹, 刘宝明, 阮文权, 缪恒锋 (3629)

基于双同位素 ( $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ - $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ ) 和 IsoSource 模型的岩溶槽谷区地下水硝酸盐来源的定量示踪 ..... 徐璐, 蒋勇军, 段世辉, 何瑞亮 (3637)

三峡库区规模化顺坡沟壑果园氮、磷输出过程及流失负荷 ..... 严坤, 王玉宽, 刘勤, 徐佩, 闫洋洋 (3646)

高度城镇化地区城市小区降雨径流污染特征及负荷估算 ..... 高斌, 许有鹏, 陆苗, 林芷欣, 徐兴 (3657)

Fe@GOCS 的制备及其对水中 As(III) 的吸附 ..... 赵超然, 单慧媚, 曾春芽, 张进贤, 彭三曦 (3665)

微塑料对水中铜离子和四环素的吸附行为 ..... 薛向东, 王星源, 梅雨晨, 庄海峰, 宋亚丽, 方程冉 (3675)

多孔填料特性对生物膜形成影响 ..... 江宇勤, 厉炯慧, 方治国 (3684)

硝化生物膜系统对低温的适应特性: MBBR 和 IFAS ..... 李初, 于莉芳, 张兴秀, 戴子承, 滑思思, 彭党聪 (3691)

单质硫自养短程反硝化耦合厌氧氨氧化强化脱氮 ..... 方文烨, 李祥, 黄勇, 郭超然, 胡羽婷, 陶仁杰 (3699)

间歇梯度曝气的生活污水好氧颗粒污泥脱氮除磷 ..... 张玉君, 李冬, 李帅, 张杰 (3707)

基于不同废污泥源的短程反硝化快速启动及稳定性 ..... 张星星, 王超超, 王焱, 徐乐中, 吴鹏 (3715)

基于 AHP-PROMETHEE II 法的鸟粪石磷回收污泥预处理方案决策 ..... 刘晓雷, 李安婕 (3725)

零价铁对厌氧消化过程中氨氮抑制解除的影响 ..... 刘吉宝, 牛雨彤, 郁达伟, 谭颖峰, 左壮, 魏源送 (3731)

基于厌氧膜生物反应器的剩余污泥-餐厨垃圾厌氧共消化性能 ..... 戴金金, 牛承鑫, 潘阳, 陆雪琴, 甄广印, 郑朝婷, 张瑞良, 何欣昱 (3740)

亚剂量抗生素诱导抗性基因水平迁移 ..... 袁其懿, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, 何义亮 (3748)

四环素胁迫对 *Shigella flexneri* 细菌四环素抗性基因抗性表达的影响过程 ..... 高品, 阮晓慧, 邱文婕, 薛罡, 钱雅洁 (3758)

羟胺对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的竞争性选择 ..... 乔昕, 王博, 郭媛媛, 彭永臻 (3765)

高温冲击对亚硝酸盐氧化过程中微生物菌群结构影响 ..... 侯晓薇, 牛永健, 李维维, 王光杰, 孙洪伟 (3773)

微生物种间相互作用产生锰氧化的普适性及其潜在应用 ..... 宁雪, 梁金松, 柏耀辉, 廖恺玲俐, 刘会娟, 曲久辉 (3781)

三亚河红树林表层沉积物中好氧氨氧化微生物的分布特征及潜在硝化速率 ..... 罗晴, 甄毓, 彭宗波, 贺惠 (3787)

臭氧污染对水稻生长、产量及矿质金属元素含量的影响 ..... 方笑堃, 罗小三, 张丹, 吴礼春, 邱丹, 陈志炜, 赵朕 (3797)

改变碳输入对新疆天山雪岭云杉林土壤呼吸的短期影响 ..... 邵康, 贡璐, 何学敏, 陈文静, 张雪妮, 朱海强 (3804)

有机无机肥配施对不同程度盐渍土 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 周慧, 史海滨, 郭珈玮, 张文聪, 王维刚 (3811)

原位电阻热脱附土壤升温机制及影响因素 ..... 葛松, 孟宪荣, 许伟, 施维林 (3822)

羽序灯心草作为酸性矿山废弃地先锋植物潜力 ..... 黄建洪, 伏江丽, 严鑫睿, 尹凤, 田森林, 宁平, 李英杰 (3829)

滴灌方式和生物质炭对温室土壤矿质态氮及其微生物调控的影响 ..... 蔡九茂, 刘杰云, 邱虎森, 吕谋超, 周新国 (3836)

棉秆炭调控对碱性镉污染水稻根际土壤真菌群落结构和功能的影响 ..... 刘师豆, 韩耀光, 朱新萍, 吴相南 (3846)

不同水分管理模式联合叶面喷施硅肥对水稻 Cd 累积的影响 ..... 魏宾纭, 周航, 刘佳炜, 张竞颐, 黄芳, 霍洋, 胡雨丹, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (3855)

螯合剂 GLDA 对象草修复镉污染农田的影响 ..... 覃建军, 唐盛爽, 蒋凯, 黄敬, 侯红波, 龙坚, 彭佩钦 (3862)

种植业面源污染防治技术发展历程分析及趋势预测 ..... 俞映惊, 杨林章, 李红娜, 朱昌雄, 杨祺, 薛利红 (3870)

《环境科学》征订启事 (3636) 《环境科学》征稿简则 (3764) 信息 (3538, 3628, 3724)

## 羽序灯心草作为酸性矿山废弃地先锋植物潜力

黄建洪, 伏江丽, 严鑫睿, 尹凤, 田森林\*, 宁平, 李英杰

(昆明理工大学环境科学与工程学院, 昆明 650500)

**摘要:** 生态复垦是当前世界各国酸性矿山废弃地修复的主要方法。通过研究云南来利山锡矿区废弃地土壤 pH 值、肥力特征及重金属含量, 以及矿区生长的羽序灯心草形态特征和植株体内重金属的分布特征, 分析植株耐酸性、对废弃地土壤肥力的适应性及对 Zn 和 Cu 等重金属污染的耐性, 探讨其作为酸性矿山废弃地先锋植物的潜力。结果表明, 研究区域根际土壤 pH 值均值范围为 3.46~4.01, 呈酸性; 土壤中有有机质、全钾、全磷和速效磷含量分别为 10.28~25.75 g·kg<sup>-1</sup>、8.84~9.32 g·kg<sup>-1</sup>、0.56~0.63 g·kg<sup>-1</sup> 和 1.82~5.72 mg·kg<sup>-1</sup>, 处于较低水平; 土壤中 Zn、Cu 和 Fe 含量均值范围分别为 54.93~114.49、92.53~127.59 和 47 133.60~112 259.63 mg·kg<sup>-1</sup>, 其中重金属 Cu 含量超出风险筛选值 1.85~2.55 倍; 研究区域羽序灯心草株高均值范围为 43.77~55.42 cm, 对照组植株高度为 51.38~57.66 cm, 无显著差异, 表明羽序灯心草具有耐酸性及对重金属污染具有耐性。进一步分析对重金属 Cu 和 Zn 的富集能力和转移特征, 发现对 Cu 和 Zn 都具有富集能力, 且对 Zn 具有运转能力, 具有一定的富集吸收潜力。株高与根际土壤中速效磷的含量显著相关, 后期羽序灯心草作为先锋植物在矿山废弃地进行种植时, 可针对性地补充含速效磷的肥料改善土壤肥力条件。综合分析结果表明, 羽序灯心草作为先锋植物修复酸性矿山废弃地具有巨大潜力。

**关键词:** 酸性矿区废弃地; 羽序灯心草; 根际土壤; 先锋植物; 潜力

中图分类号: X173; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)08-3829-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.202001129

## Acid Mine Wasteland Reclamation by *Juncus ochraceus* Buchen as a Potential Pioneer Plant

HUANG Jian-hong, FU Jiang-li, YAN Xin-rui, YIN Feng, TIAN Sen-lin\*, NING Ping, LI Ying-jie

(Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** Ecological reclamation is the major method for the revegetation of acid mine wasteland worldwide. In this study the pH, fertility characteristics, and heavy metal content of soils from Laili Mountain mine wasteland were analyzed. The research also studied the morphological characteristics and the heavy metal in *Juncus ochraceus* Buchen as well as its resistance to acid, adaptability to soil fertility in abandoned land, and tolerance to heavy metal pollution (e. g., Zn and Cu) to determine its remediation potential as a pioneer plant for acid mine wasteland. Results showed that the pH of soils in the study area were acidic, ranging from 3.46 to 4.01. The contents of organic matter, total potassium, total phosphorus, and available phosphorus was poor, being 10.28-25.75 g·kg<sup>-1</sup>, 8.84-9.32 g·kg<sup>-1</sup>, 0.56-0.63 g·kg<sup>-1</sup>, and 1.82-5.72 mg·kg<sup>-1</sup> respectively. The contents of Zn, Cu, and Fe in the soil ranged between 54.93 and 114.49 mg·kg<sup>-1</sup>, 92.53 and 127.59 mg·kg<sup>-1</sup>, and 47 133.60 and 112 259.63 mg·kg<sup>-1</sup>, whereby the Cu content was 1.85-2.55 times higher than the risk screening value. The height of *Juncus ochraceus* Buchen in the study area ranged from 43.77 cm to 55.42 cm, which was shorter than the average plant height of the control group (51.38-57.66 cm); however, this was not a significant difference, thus indicating that this plant was resistant to acidic soil and heavy metal pollution. Further analysis showed that *Juncus ochraceus* Buchen had accumulating capacity for both Cu and Zn, and transferring capacity for Zn as well. Thus, it had potential in heavy metal accumulation and absorption. Plant height was significantly related to the available phosphorus content in the rhizosphere soil. In the future, soil fertility could be improved by supplementing fertilizers containing available phosphorus when *Juncus ochraceus* Buchen is planted on the land of abandoned mines as a pioneer plant. Comprehensive analysis revealed that *Juncus ochraceus* Buchen had great potential as a pioneer plant to remediate acid mine wasteland.

**Key words:** acid mine wasteland; *Juncus ochraceus* Buchen; rhizosphere soil; pioneer plant; potential

金属矿山废弃地由于生态退化严重, 同时还存在持续的废酸与重金属污染问题而受到全世界的关注<sup>[1]</sup>. 许多国家都非常重视矿山废弃地的生态复垦工作<sup>[2-5]</sup>. 目前用于矿山废弃地修复常见的措施有物理、化学工程措施和植被恢复<sup>[6]</sup>, 其中植被恢复由于其经济性、生态性而广为使用<sup>[7]</sup>.

近年来我国在矿山废弃地植被生态修复方面取得了一些进展, 方向京等<sup>[8]</sup>指出旱冬瓜、十大功劳、清香木及杜仲这 4 种植物适合用于锡矿山废弃地生

态修复的先锋植物; 叶文玲等<sup>[9]</sup>指出可选用苏槐蓝、续断菊、苦卖菜和巢菜作为耐性植物, 在 Cu、Zn 和 Cd 含量比较高的尾矿区联合种植. 孙健<sup>[10]</sup>研究了灯心草对土壤重金属污染的抗性及其修复潜力.

本研究区域矿山废弃地由于受尾矿污染土壤

收稿日期: 2020-01-14; 修订日期: 2020-03-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1802603)

作者简介: 黄建洪(1978~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为固废资源化与场地修复技术, E-mail: huangjianhong78@163.com

\* 通信作者, E-mail: tiansenlin@sina.com

pH 低、肥力弱,在自然条件下,植物定居与植被恢复非常困难,如果仅依靠自然演替恢复,不仅时间漫长,且效果不佳<sup>[11]</sup>. 乡土植物由于长期自然选择的作用,能够适应这种极端的生存环境,对本地逆境条件具有很强的耐性、适应性,这些植物在重金属污染的植物修复中起到决定性的作用<sup>[12]</sup>. 本文在实地调查中发现,研究区域有羽序灯心草(*Juncus ochraceus* Buchen)、西南桦(*Betula alnoides*)以及少量其他草本类植物生长. 针对研究区域的特征,开展潜在耐性先锋植物的筛选,对加快研究区域酸性矿山废弃地植被恢复是十分必要的.

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区域地处高黎贡山支脉大西山与腾冲火山的中间带,是梁河县境内三大主要山脉之一. 研究区位于海拔2 243~2 394 m区间,土壤类型以高寒山区黄棕壤为主,自然土壤 pH 值 5.10,属半湿润亚热带季风气候,光热能量资源丰富,水湿条件优越,多年年均气温 18.3℃,年均降雨量 1 403.8 mm. 森林种类主要分为亚热带常绿阔叶林、山地落叶阔叶林、针叶林及山地矮林这 4 种类型,期间分布种类繁多的草本植物,如蕨菜、铁芒萁、紫茎泽兰和羽序灯心草等. 研究区域锡、铁矿资源丰富,由于历史上私挖滥采留下大量废弃采矿场、废土石堆场和尾矿废弃地,长期以来产生的酸性矿山废水和废渣,不仅使矿山废弃地生态严重退化,让周边植物多样性遭受破坏,尾矿库废弃地及周边很少有植物分布. 在实地调查中发现,研究区域酸性矿山废弃地中主要生长有羽序灯心草、西南桦以及少量其他草本类植物,其中羽序灯心草在研究区域的生长状况最好.

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 植物和土壤样品采集

对尾矿库废弃地进行现场调查,发现羽序灯心草在酸性矿山废弃地上的生长状况最好,因此本研究主要采集羽序灯心草进行分析. 本研究依据尾矿堆存场地及植物生长状况进行筛选,选取现有尾矿堆存场作为代表性区域(共 6 块区域),在代表性区内随机选择自然生长的羽序灯心草,采集完整植株,做好标记. 共采集到羽序灯心草样品 50 组. 选取周围类似但未被矿山废弃地影响的土壤上生长的羽序灯心草 6 组作为对照组.

土壤样品为附着在植物根系上的表层土壤(0~20 cm),采用抖土法现场取土、混合,用封口袋密封保存<sup>[13]</sup>.

#### 1.2.2 样品测定与分析方法

采集的羽序灯心草取出,用自来水洗去泥土和污物,用去离子水冲洗干净,再用乙二胺四乙酸二钠溶液浸泡 20 min<sup>[14]</sup>,浸泡结束用去离子水清洗,放入烘箱内 50℃ 烘至恒重后取出,将每株植物分离为根、茎、叶和穗四部分,用粉碎机研磨后过 100 目筛,分别装入自封袋编号后备用. 植物样品中重金属含量采用湿法(HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>)消解,消解后的植物样品采用火焰原子吸收分光光度计(北京普析通用 TAS-990)测定灯心草样品消解液中 Fe、Zn 和 Cu 等主要金属元素含量. 质量保证采用双平行样及加标回收法,Cu、Zn 和 Fe 的回收率分别为 92.7%、98.3% 和 91.1%.

土壤样品带回实验室后摊成薄层,拣出石块、植物根系杂质,于室内自然风干,将土样进行研磨,过 2 mm 筛后分出一部分样品用于测定 pH,剩下的部分继续研磨,过 100 目筛后保存用于土壤其他项目的测定. 土壤 pH 测定按照文献[15]中的方法,采用点位法来测定土壤的 pH. 将 100 目筛的土壤样品采用 HClO<sub>4</sub>-HNO<sub>3</sub>-HF 进行微波消解,采用火焰原子吸收分光光度计(北京普析通用 TAS-990)测定土壤样品消解液中主要金属元素含量. Cu、Zn 和 Fe 的回收率分别为 94.1%、97.0% 和 92.3%. 测定土壤肥力指标包括有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷和速效钾等 7 个指标,重铬酸钾氧化-容量法测定有机质,氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法测定总磷,酸熔-火焰光度计法测定总钾<sup>[16]</sup>,测定土壤碱解氮、速效磷和速效钾分别采用碱性扩散法、0.5 mol·L<sup>-1</sup>碳酸氢钠浸提法和 0.1 mol·L<sup>-1</sup>乙酸铵浸提-火焰光度法<sup>[17]</sup>.

### 1.3 数据处理

数据处理分析采用 SPSS 19,作图用 Origin 8.0.

富集系数 = 植物体内重金属含量/土壤中重金属含量; 转运系数 = 植物地上部重金属含量/地下部重金属含量<sup>[18]</sup>; 滞留率 = (地下部重金属元素的含量 - 地上部重金属元素的含量)/地下部重金属元素的含量 × 100%.

## 2 结果与分析

### 2.1 酸性矿山废弃地羽序灯心草根际土壤肥力及植株形态特征

#### 2.1.1 酸性矿山废弃地根际土壤的肥力指标

尾矿、废土石和露采剥离面这 3 种类型酸性矿山废弃地羽序灯心草根际土壤中有有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷和速效钾基本肥力指标测定结果如表 1. 参照土壤肥力指标分级标准<sup>[19]</sup>,结

果表明,3种根际土壤中有有机质、全钾、全磷和速效磷含量分别为10.28~25.75 g·kg<sup>-1</sup>、8.84~9.32 g·kg<sup>-1</sup>、0.56~0.63 g·kg<sup>-1</sup>和1.82~5.72 mg·kg<sup>-1</sup>处于较低水平,养分不足;速效钾、碱解氮和全氮含量分别为106.21~191.60 mg·kg<sup>-1</sup>、66.92~519.55 mg·kg<sup>-1</sup>和2.95~5.04 g·kg<sup>-1</sup>,处于中上水

平.对照组根际土壤肥力指标有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷和速效钾均值分别为:14.5 g·kg<sup>-1</sup>、7.7 g·kg<sup>-1</sup>、1.2 g·kg<sup>-1</sup>、15.9 g·kg<sup>-1</sup>、494 mg·kg<sup>-1</sup>、8.9 mg·kg<sup>-1</sup>和173 mg·kg<sup>-1</sup>,其中速效磷含量显著高于矿山废弃地,其他肥力指标无显著差异.

表1 根际土壤肥力指标

Table 1 Basic fertility index of rhizosphere soil

肥力指标	根际土壤类型(样品数)		
	尾矿(19)	废土石(26)	露采剥离面(5)
有机质/g·kg <sup>-1</sup>	25.754 ± 9.946	18.953 ± 13.548	10.280 ± 3.060
全氮/g·kg <sup>-1</sup>	5.039 ± 2.9345	3.788 ± 2.122	2.946 ± 1.142
全磷/g·kg <sup>-1</sup>	0.626 ± 0.219	0.559 ± 0.372	0.572 ± 0.121
全钾/g·kg <sup>-1</sup>	9.185 ± 2.828	8.837 ± 3.184	9.324 ± 0.372
碱解氮/mg·kg <sup>-1</sup>	317.64 ± 522.26	519.55 ± 590.71	66.92 ± 46.99
速效磷/mg·kg <sup>-1</sup>	5.72 ± 5.30	4.56 ± 5.70	1.82 ± 0.41
速效钾/mg·kg <sup>-1</sup>	106.21 ± 45.72	118.96 ± 45.67	191.60 ± 33.18

### 2.1.2 酸性矿山废弃地羽序灯心草的形态特征

羽序灯心草株高、根长以及各部位重量测量结果如表2,研究区域羽序灯心草株高均值范围为43.77~55.42 cm,对照组植株高度范围为51.38~57.66 cm,结果表明,对照组羽序灯心草株高略高于矿山废弃地但无显著差异.通过对不同根际土壤肥力指标与羽序灯心草生长特征进行Pearson相关分析,发现羽序灯心草的株高与根际土壤中的有机质、全氮、碱解氮、全磷、全钾和速效钾等肥力指标之间

不存在显著相关关系( $P > 0.05$ ),但羽序灯心草株高与有效养分速效磷之间存在显著相关关系( $r = 0.491, P = 0.001 < 0.05$ ).羽序灯心草能够在研究区域酸性矿山废弃地土壤肥力贫瘠条件下正常生长,说明该研究区内羽序灯心草具有较强的适应性,具有作为不同改良根际土壤上生态恢复先锋植物的潜力,株高与速效磷之间存在显著相关关系,说明土壤速效磷缺乏问题可能成为研究区域酸性矿区废弃地种植羽序灯心草主要胁迫因素.

表2 不同根际土壤羽序灯心草各部分指标<sup>1)</sup>Table 2 Different parts of *Juncus ochraceus* Buchen growing in different rhizosphere soils

根际土壤类型(样品数)	株高/cm	根长/cm	根重/g	茎重/g	叶重/g	穗重/g	总重量/g
尾矿(19)	55.42 ± 8.40a	13.29 ± 4.17a	3.21 ± 2.00a	5.41 ± 4.07a	1.33 ± 0.90a	1.80 ± 1.19a	11.58 ± 5.72a
废土石(26)	43.77 ± 9.37b	13.07 ± 5.81a	4.71 ± 4.26a	6.16 ± 5.04a	0.64 ± 0.45b	1.21 ± 0.81a	12.71 ± 9.09a
露采剥离面(5)	52.00 ± 8.03a	14.82 ± 1.84a	5.39 ± 2.12a	5.97 ± 2.26a	1.07 ± 0.32a	1.68 ± 1.01a	14.11 ± 4.79a

1)用LSD方法进行多重比较;不同小写字母表示组间差异显著( $P < 0.05$ ),相同小写字母表示组间差异不显著( $P > 0.05$ ),下同

### 2.2 酸性矿山废弃地羽序灯心草的耐酸性

研究区域羽序灯心草根际土壤pH值均值范围为3.46~4.01,不同根际土壤pH值及土壤背景pH值如表3,对比分析结果可以看出,研究区域3种矿山废弃地根际土壤pH值均显著低于土壤背景pH值( $P$ 值均为 $0.000 < 0.001$ );3种类型根际土壤pH值与羽序灯心草株高进行Pearson相关分析结果表明,根际土壤pH值与植株高两者之间不存在显著相关关系( $r = -0.268, P = 0.063 > 0.05$ ).在根际土壤pH值显著低于土壤背景pH值的条件下,羽序灯心草能够正常生长,说明羽序灯心草具有较强耐酸性,具备作为酸性矿山废弃地植被恢复先锋植物的潜力.此外,对3种类型矿山废弃地根际土壤pH的ANOVA分析结果表明,根际土壤类型为露采剥离面的pH值显著低于尾矿和废土石的pH值( $P$ 值分别为0.008

和0.049  $< 0.05$ ),说明人工干扰对根际土壤氧化程度的影响很大,pH下降程度也越高.

表3 不同根际土壤pH均值与土壤背景值pH

Table 3 Statistic pH value of different rhizosphere soils and background soils

根际土壤类型(样品数)	pH
尾矿(19)	3.46 ± 0.5a
废土石(26)	3.62 ± 0.35a
露采剥离面(5)	4.01 ± 0.08b
土壤背景值 <sup>[20]</sup>	5.10c

### 2.3 羽序灯心草不同部位及根际土壤中主要金属分布的特征

羽序灯心草不同部位及根际土壤中Zn、Cu和Fe含量如表4和图1.根际土壤中Zn、Cu和Fe含量均值范围分别为54.93~114.49、92.53~127.59

和47 133.60 ~ 112 259.63 mg·kg<sup>-1</sup>,羽序灯心草不同部位中的 Zn、Cu 和 Fe 含量存在一定的差异,Zn 的含量除露采剥离面地下部分高于地上部分外,尾矿和废土石均为地上部分高于地下部分,其中尾矿上生长的羽序灯心草地上部分 Zn 含量最高,为 37.25 mg·kg<sup>-1</sup>; Cu 和 Fe 的含量均为地下部分高于地上部分,其中尾矿上生长的羽序灯心草根 Cu 和 Fe 含量最高,分别为 55.82 mg·kg<sup>-1</sup>和 2 117.22

mg·kg<sup>-1</sup>. 通过对根际土壤与羽序灯心草体内的 Zn 和 Cu 两种重金属含量进行 Pearson 相关分析,结果表明,根际土壤与羽序灯心草体内的 Zn 和 Cu 含量无显著相关关系 ( $r_{(Zn)} = -0.027, P_{(Zn)} = 0.854$ ;  $r_{(Cu)} = 0.174, P_{(Cu)} = 0.258$ ). 说明根际土壤中重金属的含量对羽序灯心草体内的重金属含量无直接影响,羽序灯心草具有作为重金属矿区废弃地植被恢复先锋植物的潜力.

表 4 羽序灯心草体内及其根际土壤主要金属含量

Table 4 Main metal contents in *Juncus ochraceus* Buchen and its rhizosphere soil

主要金属	根际土壤类型	根际土壤主要金属 /mg·kg <sup>-1</sup>	羽序灯心草植株	
			地下部分/mg·kg <sup>-1</sup>	地上部分/mg·kg <sup>-1</sup>
Zn	尾矿	66.63 ± 18.25a	23.95 ± 10.50a	37.25 ± 10.52a
	废土石	114.49 ± 175.02a	31.57 ± 23.81a	31.95 ± 13.06a
	露采剥离面	54.93 ± 6.84a	24.92 ± 9.65a	24.51 ± 8.76b
Cu	尾矿	125.82 ± 94.73a	55.82 ± 34.75a	5.23 ± 8.04a
	废土石	127.59 ± 130.21a	38.45 ± 39.07a	2.95 ± 2.35a
	露采剥离面	92.53 ± 142.36a	24.44 ± 17.36a	6.18 ± 11.41a
Fe	尾矿	112 259.63 ± 56 078.26a	2 117.22 ± 304.85a	906.12 ± 374.11a
	废土石	74 389.85 ± 40 314.86b	1 884.98 ± 246.91b	901.15 ± 387.56a
	露采剥离面	47 133.60 ± 4 755.68b	1 934.82 ± 224.95a	973.49 ± 446.15a

#### 2.4 羽序灯心草体内主要金属的富集、转运能力及滞留率

富集系数能够反映植物对土壤主要金属元素的吸收能力的强弱,富集系数越大,则植物对该金属的富集能力越强.同时能够反映植物对重金属的吸收潜力,可推断出植物的修复能力<sup>[21]</sup>.从表 5 可以看出,3 种类型根际土壤上生长的羽序灯心草均对 Cu 的富集能力最强,Cu 的富集系数最大可达 14.53. 转运系数反映的是重金属在植物体内由根部向地上部转移的能力,3 种不同的根际土壤上生长的羽序灯心草对重金属的转运能力均表现为 Zn > Cu. 滞留率可体现植物对重金属耐性能力高低,也是植物根部对重金属污染的一种保护性反应<sup>[22]</sup>. 3 种不同根际土壤上生长的羽序灯心草的滞留效应表现为 Cu > Zn,与转运能力表现出相反的变化规律,对 Cu 的

滞留效应较大,可达到 93.26%. 说明对于不同的根际土壤上生长的羽序灯心草,对 Cu 和 Zn (除根际土壤为尾矿对 Zn 富集能力外)均有一定的富集能力,对 Zn 有很好的运转能力,且植株体内 Cu 和 Zn 均未对植株生长造成显著胁迫作用,羽序灯心草具备作为矿山废弃地植被修复先锋植物的潜力.

### 3 讨论

酸性矿山废弃地土壤结构差,植物生长所需的养分元素缺乏,重金属含量高,会对植物的生长发育造成较大的危害<sup>[23]</sup>.羽序灯心草能够在酸性矿山废弃地上生存繁衍并且在自然群落中占据优势地位,这可能由于植物在长期的自然选择过程中产生了对酸污染及重金属毒害的防卫机制,从而对污染产生了耐性<sup>[24,25]</sup>.

根际土壤 pH 值均值范围为 3.46 ~ 4.01,呈酸性,土壤中含重金属 Cu 和 Zn,且 Cu 含量高于土壤环境质量风险筛选值<sup>[26]</sup>,超标倍数为 1.85 ~ 2.55. 本研究根际土壤中有机质、全钾、全磷和速效磷含量处于中下水平,这可能由于重金属在土壤中的积累导致土壤性质发生变化,从而影响到土壤肥力指标<sup>[27]</sup>,另一个导致土壤肥力低的因素可能是土壤 pH 值低,土壤酸度是土壤的重要化学性质,对土壤中养分存在状态和有效程度、土壤的生物化学过程、微生物活动及植物本身等都有显著作用<sup>[28]</sup>.羽序灯心草株高显著高于文献<sup>[29]</sup>所记载的样品株高,且

表 5 羽序灯心草对重金属的富集系数、转运系数和滞留率

Table 5 Enrichment coefficient, transfer factor, and retention rate of heavy metals in *Juncus ochraceus* Buchen

项目	根际土壤类型	Zn	Cu
富集系数	尾矿	0.92	14.53
	废土石	1.06	3.26
	露采剥离面	1.09	4.02
转运系数	尾矿	1.61	0.15
	废土石	1.37	0.14
	露采剥离面	1.24	0.07
滞留率/%	尾矿	-60.88	73.39
	废土石	-37.50	78.38
	露采剥离面	-23.66	93.26

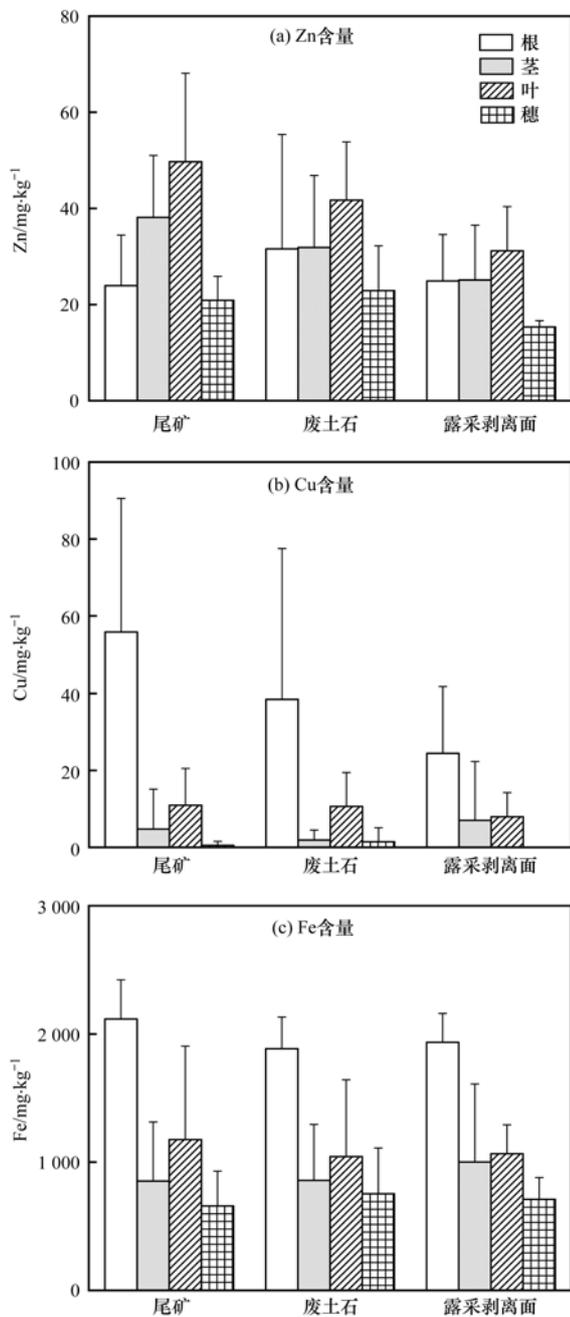


图1 各种根际土壤上羽序灯心草不同部位主要金属含量  
Fig. 1 Main metal contents in different parts of *Juncus ochraceus* Buchen in different rhizosphere soil

植株高度与根际土壤 pH 值无明显相关性,表明羽序灯心草具有很好的耐酸性.综合分析羽序灯心草各部位主要金属的含量及其对重金属 Cu 和 Zn 的富集系数、运转系数和滞留率,发现其对 Cu 和 Zn 均有一定的富集能力,其中对有害重金属 Cu 的富集能力最强,对 Zn 具有较好的运转能力,根际土壤与羽序灯心草体内的 Cu 和 Zn 含量无显著相关关系,根际土壤重金属未对植株生长造成显著胁迫作用,羽序灯心草具有在高含量重金属环境中生存的能力.

李清飞等<sup>[30]</sup>指出麻疯树具有耐低 pH 值和高

含量金属的特性,但主要生长在海拔高度低于 1700m 的河谷地区且生长环境温度较高;李榜江等<sup>[31]</sup>研究了极端酸性条件下蜈蚣草对重金属污染环境的修复效应,但蜈蚣草喜温暖湿润和半阴环境;张宏等<sup>[32]</sup>指出矛叶苎草对铜、锌有较好的耐性,但株高较低,且生长环境 pH 为中性.羽序灯心草具有较好的耐酸性及对重金属有较好的耐受性,在酸性矿区废弃地上能够生长定居并易于繁殖,且对 Cu 有很高的富集能力,可作为酸性矿区废弃地修复先锋植物,提高植被覆盖率,起到治理污染与保持水土的作用.

#### 4 结论

(1) 研究区域羽序灯心草根际土壤中有机质、全钾、全磷和速效磷含量均值范围分别为  $10.28 \sim 25.75 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $8.84 \sim 9.32 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.56 \sim 0.63 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $1.82 \sim 5.72 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,处于较低水平,羽序灯心草能够在土壤肥力贫瘠条件下生长,对矿区废弃地恶劣环境具有较强适应性;株高与有效养分速效磷之间存在显著正相关关系,后期羽序灯心草作为先锋植物在矿山废弃地进行种植时,可针对性地补充含速效磷的肥料改善土壤肥力条件.

(2) 研究区域根际土壤的 pH 值均值范围为  $3.46 \sim 4.01$ ,呈酸性,植株高度与根际土壤 pH 值无显著相关性,说明羽序灯心草具有较强的耐酸性.

(3) 研究区域根际土壤中 Zn、Cu 和 Fe 含量均值范围分别为  $54.93 \sim 114.49$ 、 $92.53 \sim 127.59$  和  $47133.60 \sim 112259.63 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,羽序灯心草不同部位 Zn、Cu 和 Fe 含量存在差异,对重金属 Cu 和 Zn 均有一定富集能力,对 Zn 有较好的运转能力;根际土壤与羽序灯心草体内的 Zn 和 Cu 含量无显著相关关系,羽序灯心草能够在重金属 Zn 和 Cu 含量较高的土壤上正常生长,对酸性矿山废弃地重金属污染具有较好的耐性.

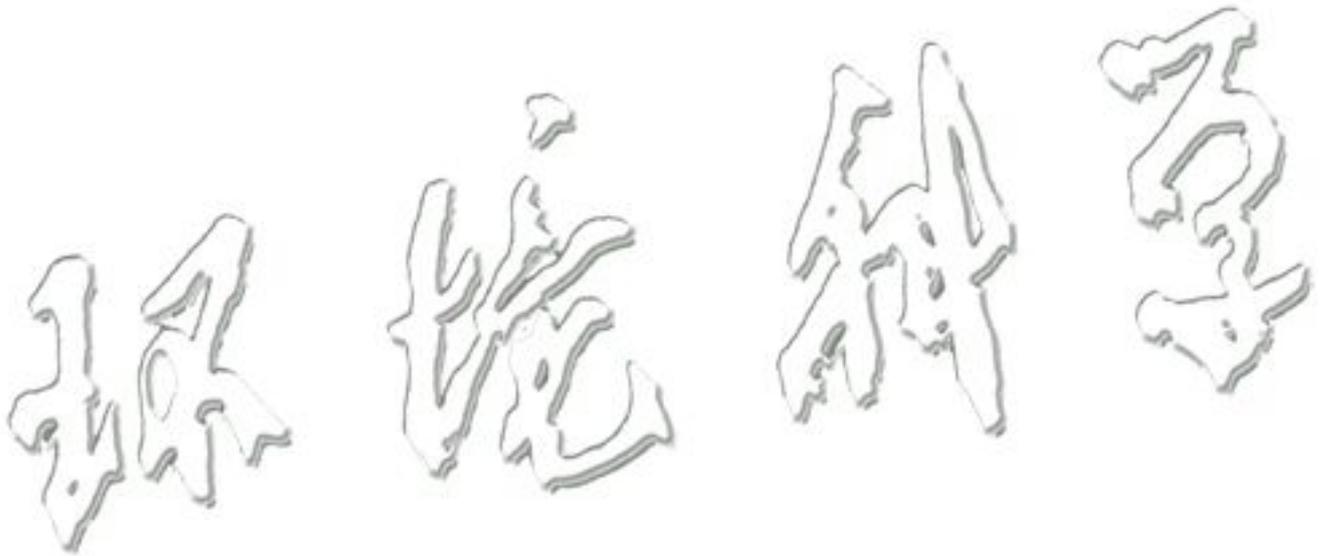
(4) 野外调查和实验研究表明,羽序灯心草具有较强的耐酸性,对重金属均有较强的富集能力及耐受性,且生物量较大,生长速度快,作为研究区域酸性矿山废弃地先锋植物具有较大的潜力.

#### 参考文献:

- [1] 王婧静. 金属矿山废弃地生态修复与可持续发展研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(15): 8082-8084, 8087.  
Wang J J. Research on the ecological restoration and sustainable development of discarded land of metal mine wasteland [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(15): 8082-8084, 8087.
- [2] 韦朝阳, 陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1196-1203.  
Wei C Y, Chen T B. Hyperaccumulators and phytoremediation of

- heavy metal contaminated soil: a review of studies in China and abroad [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21** (7): 1196-1203.
- [ 3 ] Liu L W, Li W, Song W P, *et al.* Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: principles and applicability [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **633**: 206-219.
- [ 4 ] Meerts P, Van Isacker N. Heavy metal tolerance and accumulation in metalicolous and non-metallicolous populations of *Thlaspi caerulescens* from continental Europe [J]. *Plant Ecology*, 1997, **133**(2): 221-231.
- [ 5 ] Iqbal M T. Acid tolerance mechanisms in soil grown plants [J]. *Malaysian Journal of Soil Science*, 2012, **16**(1): 1-21.
- [ 6 ] 蓝崇钰, 束文圣. 矿业废弃地植被恢复中的基质改良 [J]. *生态学杂志*, 1996, **15**(2): 55-59.
- Lan C Y, Shu W S. Amelioration of soil media during vegetative rehabilitation in the mining wasteland [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1996, **15**(2): 55-59.
- [ 7 ] Mendez M O, Maier R M. Phytoremediation of mine tailings in temperate and arid environments [J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2008, **7**(1): 47-59.
- [ 8 ] 方向京, 王伟, 张洪江, 等. 云南省个旧锡矿山废弃地植被恢复技术 [J]. *中国水土保持科学*, 2009, **7**(6): 40-45.
- Fang X J, Wang W, Zhang H J, *et al.* Vegetation restoration technique of mining wasteland in Gejiu stannary of Yunnan province [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, **7**(6): 40-45.
- [ 9 ] 叶文玲, 陈增, 徐晓燕. 铜陵铜尾矿库优势植物对重金属富集特征研究 [J]. *环境科学与技术*, 2015, **38**(5): 11-14, 20.
- Ye W L, Chen Z, Xu X Y. Heavy metal contents and enrichment characteristics of dominant plants in copper mine tailings in Tongling of Anhui province [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **38**(5): 11-14, 20.
- [ 10 ] 孙健. 灯心草对土壤重金属污染的抗性及其修复潜力研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2006.
- Sun J. Study on the resistance of *Juncus effuses* to heavy metal and potential of *Juncus effuses* for phytoremediation of heavy metal contaminated soil [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2006.
- [ 11 ] 赵娜, 李元, 祖艳群. 金属矿区先锋植物与废弃地的植被恢复 [J]. *云南农业大学学报*, 2008, **23**(3): 392-395.
- Zhao N, Li Y, Zu Y Q. Study on pioneer plant and vegetation restoration of mined wasteland [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2008, **23**(3): 392-395.
- [ 12 ] 陆金, 赵兴青, 黄健, 等. 铜陵狮子山矿区尾矿库及周边 17 种乡土植物重金属含量及富集特征 [J]. *环境化学*, 2019, **38**(1): 78-86.
- Lu J, Zhao X Q, Huang J, *et al.* Heavy metal contents and enrichment characteristics of 17 species indigenous plants in the tailing surrounding in Shizishan, Tongling [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, **38**(1): 78-86.
- [ 13 ] 秦丽, 祖艳群, 李元, 等. 会泽铅锌矿渣堆周边 7 种野生植物重金属含量及累积特征研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(8): 1558-1563.
- Qin L, Zu Y Q, Li Y, *et al.* Heavy metal contents and accumulation characteristic of seven wild plants from the slagheap surrounding of Huize Lead-zinc tailings [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(8): 1558-1563.
- [ 14 ] 可欣, 李培军, 张响, 等. 利用乙二胺四乙酸淋洗修复重金属污染的土壤及其动力学 [J]. *应用生态学报*, 2007, **18**(3): 601-606.
- Ke X, Li P J, Zhang Y, *et al.* Heavy metals removal and its kinetics in contaminated soil under effects of EDTA washing [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, **18**(3): 601-606.
- [ 15 ] 全国农业技术推广服务中心, 杜森, 高祥照. 土壤分析技术规范 [M]. (第二版). 北京: 中国农业出版社, 2006. 73-75.
- [ 16 ] 雷冬梅, 段昌群, 王明. 云南不同矿区废弃地土壤肥力与重金属污染评价 [J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(2): 612-616.
- Lei D M, Duan C Q, Wang M. Soil fertility and heavy metal contamination in abandoned regions of different mine tailings in Yunnan province [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, **26**(2): 612-616.
- [ 17 ] 杨皓, 胡继伟, 黄先飞, 等. 喀斯特地区金刺梨种植基地土壤肥力研究 [J]. *水土保持研究*, 2015, **22**(3): 50-55.
- Yang H, Hu J W, Huang X F, *et al.* Study on soil fertility of *Rosa sterilis* S. D. Shi planting bases located in Karst Areas [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, **22**(3): 50-55.
- [ 18 ] 张云霞, 宋波, 宾娟, 等. 超富集植物藿香蓟 (*Ageratum conyzoides* L.) 对镉污染农田的修复潜力 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2453-2459.
- Zhang Y X, Song B, Bin J, *et al.* Remediation potential of *Ageratum conyzoides* L. on cadmium contaminated farmland [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2453-2459.
- [ 19 ] 张德刚, 袁寒, 刘艳红. 云南锡矿尾矿库土壤肥力特征与重金属污染分析 [J]. *西南农业学报*, 2017, **30**(5): 1158-1161.
- Zhang D G, Yuan H, Liu Y H. Analysis of soil heavy metal pollution and fertility properties in tin tailings storehouse of Yunnan province [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2017, **30**(5): 1158-1161.
- [ 20 ] 徐正武. 梁河土壤 [Z]. 德宏: 云南省梁河县农业局, 1994. 40-41.
- [ 21 ] 崔爽, 周启星, 晁雷. 某冶炼厂周围 8 种植物对重金属的吸收与富集作用 [J]. *应用生态学报*, 2006, **17**(3): 512-515.
- Cui S, Zhou Q X, Chao L. Absorption and accumulation of heavy metals by plants around a smelter [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, **17**(3): 512-515.
- [ 22 ] 徐华伟, 张仁陟, 谢永. 铅锌矿区先锋植物野艾蒿对重金属的吸收与富集特征 [J]. *农业环境科学学报*, 2009, **28**(6): 1136-1141.
- Xu H W, Zhang R Z, Xie Y. Accumulation and distribution of heavy metals in *Artemisia lavandulaefolia* at Lead-zinc mining area [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, **28**(6): 1136-1141.
- [ 23 ] 李江遐, 张军, 黄伏森, 等. 铜矿区土壤重金属污染与耐性植物累积特征 [J]. *土壤通报*, 2016, **47**(3): 719-724.
- Li J X, Zhang J, Huang F S, *et al.* Heavy metal contamination of soil and its accumulation in tolerant plants in copper mine Tongling area [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, **47**(3): 719-724.
- [ 24 ] 何东, 邱波, 彭尽晖, 等. 湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(9): 3595-3600.
- He D, Qiu B, Peng J H, *et al.* Heavy metal contents and enrichment characteristics of dominant plants in a Lead-zinc tailings in Xiashuiwan of Hunan province [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(9): 3595-3600.
- [ 25 ] 张军英, 席荣. 金川镍尾矿库复垦的限制因子及植物适应性 [J]. *甘肃冶金*, 2007, **29**(4): 92-95.
- Zhang J Y, Xi R. Restricted factors and plant adaptability of reclamation in Jinchuan nickel tailings bank [J]. *Gansu Metallurgy*, 2007, **29**(4): 92-95.

- [26] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准 (试行)[S].
- [27] 韩永刚. 福建省福州市叶蜡石矿区废弃地土壤肥力状况分析[J]. 亚热带水土保持, 2013, **25**(3): 6-9.  
Han Y G. Analysis on the soil fertility status at the deserted pyrophyllite mines of Fuzhou municipality, Fujian province[J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2013, **25**(3): 6-9.
- [28] 林智, 刘永兵, 赵从举, 等. 南渡江塘柳塘底泥构建农田土壤的潜在生态风险与肥力潜力评价[J]. 南方农业学报, 2014, **45**(5): 796-802.  
Lin Z, Liu Y B, Zhao C J, *et al.* Assessment on potential ecological risk and potential fertility of river sediments constructing cultivable layer in the lower Nandujiang river[J]. Journal of Southern Agriculture, 2014, **45**(5): 796-802.
- [29] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志(第十三卷第三分册)[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 176-177.
- [30] 李清飞, 周小勇, 仇荣亮, 等. 麻疯树复垦酸性矿山废弃地及其生长影响因子研究[J]. 土壤学报, 2010, **47**(1): 172-176.  
Li Q F, Zhou X Y, Qiu R L, *et al.* Phytoremediation of acid mining wasteland with *Jatropha curcas* L. and factors affecting growth of the plant[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, **47**(1): 172-176.
- [31] 李榜江, 王龙昌, 龙明忠, 等. 极端酸性条件下蜈蚣草对重金属污染环境的修复效应[J]. 水土保持学报, 2013, **27**(5): 183-187.  
Li B J, Wang L C, Long M Z, *et al.* Remediation effect of *Pteris vittata* on heavy metal polluted environment under the extreme acid conditions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, **27**(5): 183-187.
- [32] 张宏, 沈章军, 陈政, 等. 铜尾矿区9种优势植物体内重金属和氮磷含量研究[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(10): 1478-1484.  
Zhang H, Shen Z J, Chen Z, *et al.* An investigation of heavy-metal, nitrogen and phosphorus concentration in nine dominant plant species in a copper mine tailings area[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, **20**(10): 1478-1484.



## CONTENTS

Comparison Analysis of the Effect of Emission Reduction Measures for Major Events and Heavy Air Pollution in the Capital .....	ZHONG Yi-sheng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i>	(3449)
Evaluation of Different ISORROPIA-II Modes and the Influencing Factors of Aerosol pH Based on Tianjin Online Data .....	GAO Jie, SHI Xu-rong, WEI Yu-ting, <i>et al.</i>	(3458)
Emission Characteristics of Particulate Organic Matter from Cooking .....	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i>	(3467)
Characteristics and Sources of 12 Trace Amount Elements in PM <sub>2.5</sub> During a Period of Heavy Pollution in Huanggang, Central China .....	CHEN Zhan-le, TIAN Qian, MAO Yao, <i>et al.</i>	(3475)
Aerosol Optical Properties over the Ebinur Region .....	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie	(3484)
Characteristics of Secondary Organic Particles and the Potential Formation of SOA from VOCs During Wintertime Heavy Pollution Episodes in Tianjin .....	XU Hong, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i>	(3492)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs at Different Pollution Levels During the Winter in an Urban Area in Zhengzhou .....	LI Yi-dan, YIN Sha-sha, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i>	(3500)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds (IVOCs) from Biomass Burning in the Yangtze River Delta During 2010-2018 .....	ZHU Yong-hui, WANG Qian, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(3511)
Emission Characteristics of Biogenic Volatile Compounds (BVOCs) from Common Greening Tree Species in Northern China and Their Correlations with Photosynthetic Parameters .....	XU Yan, LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, <i>et al.</i>	(3518)
Characteristics of Surface Ozone and Impact Factors at Different Station Types During the Autumn in Guangzhou .....	GAO Ping, ZHUANG Li-yue, WANG Long, <i>et al.</i>	(3527)
Pollution Characteristics and Sensitivity Analysis of Atmospheric Ozone in Taian City .....	LI Kai, LIU Min, MEI Ru-bo	(3539)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dust from Non-ferrous Smelting Parks .....	FENG Yu-yao, SHI Jian-wu, ZHONG Yao-qian, <i>et al.</i>	(3547)
Pollution and Source Analysis of Heavy Metal in Surface Dust from Xi'an University Campuses .....	FAN Xin-yao, LU Xin-wei, LIU Hui-min, <i>et al.</i>	(3556)
Monitoring Method of Total Particulate Matter in Ultra-low-emission and High-humidity Exhaust Gas from Stationary Sources and an Actual Test in a Gas Power Plant .....	HU Yue-qi, YAN Xu, KONG Chuan, <i>et al.</i>	(3563)
Vessels' Air Pollutant Emissions Inventory and Emission Characteristics in the Xiamen Emission Control Area .....	WANG Jian, HUANG Zhi, LIU Yan-ying, <i>et al.</i>	(3572)
Method for High-resolution Emission Inventory for Road Vehicles in Chengdu Based on Traffic Flow Monitoring Data .....	PAN Yu-jin, LI Yuan, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i>	(3581)
Inversion of Water Quality Parameters Based on UAV Multispectral Images and the OPT-MPP Algorithm .....	HUANG Xin-xi, YING Han-ting, XIA Kai, <i>et al.</i>	(3591)
Effects of Different Water Stratification on the Vertical Distribution of Nitrogen in Sediment Interstitial Waters: A Case Study of the Three Gorges Reservoir and Xiaowan Reservoir .....	LIU Jing-si, ZHU Xiao-sheng, HU Zi-long, <i>et al.</i>	(3601)
Pollution Status and Pollution Behavior of Microplastic in Surface Water and Sediment of Urban Rivers .....	ZHAO Xin, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial and Temporal Variation of Phytoplankton Community Structure and Its Influencing Factors in Shanghai River Channels .....	XU Zhi, CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, <i>et al.</i>	(3621)
Restoration of River Sediment by Calcium Peroxide (CaO <sub>2</sub> ) Combined with Biochar .....	LI Yu-ping, JIANG Ying-ying, LIU Bao-ming, <i>et al.</i>	(3629)
Quantification of Nitrate Sources to Groundwater in Karst Trough-valley Areas Based on Dual Stable Isotopes of $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ and the IsoSource Model .....	XU Lu, JIANG Yong-jun, DUAN Shi-hui, <i>et al.</i>	(3637)
Dynamic Process of Nitrogen and Phosphorus Export and Loss Load in an Intensive Orchard with Ridge and Furrow Plantation in the Three Gorges Reservoir Area .....	YAN Kun, WANG Yu-kuan, LIU Qin, <i>et al.</i>	(3646)
Analysis of Rainfall Runoff Pollution and Pollution Load Estimation for Urban Communities in a Highly Urbanized Region .....	GAO Bin, XU You-peng, LU Miao, <i>et al.</i>	(3657)
Adsorption of As(III) in Water by Iron-loaded Graphene Oxide-Chitosan .....	ZHAO Chao-ran, SHAN Hui-mei, ZENG Chun-ya, <i>et al.</i>	(3665)
Sorption Behaviors of Copper Ions and Tetracycline on Microplastics in Aqueous Solution .....	XUE Xiang-dong, WANG Xing-yuan, MEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(3675)
Effect of Porous Fillers Properties on Biofilm Growth .....	JIANG Yu-qin, LI Jiong-hui, FANG Zhi-guo	(3684)
Adaptability of Nitrifying Biofilm Systems to Low Temperature: MBBR and IFAS .....	LI Ren, YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, <i>et al.</i>	(3691)
Improved on Nitrogen Removal of Anaerobic Ammonia Oxidation by Coupling Element Sulfur-based Autotrophic Short-cut Denitrification .....	FANG Wen-ye, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3699)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Domestic Sewage Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration .....	ZHANG Yu-jun, LI Dong, LI Shuai, <i>et al.</i>	(3707)
Rapid Start-up and Stability of Partial Denitrification Based on Different Waste Sludge Sources .....	ZHANG Xing-xing, WANG Chao-chao, WANG Yao, <i>et al.</i>	(3715)
Decision-making Analysis of Excess Sludge Pretreatment for Struvite Recovery Based on AHP-PROMETHEE II Method .....	LIU Xiao-lei, LI An-jie	(3725)
Effect on Ammonia Inhibition Mitigation in the Anaerobic Digestion Process with Zero-Valent Iron .....	LIU Ji-bao, NIU Yu-tong, YU Da-wei, <i>et al.</i>	(3731)
Performance of Anaerobic Membrane Bioreactors for the Co-digestion of Sewage Sludge and Food Waste .....	DAI Jin-jin, NIU Cheng-xin, PAN Yang, <i>et al.</i>	(3740)
Antibiotics Induce Horizontal Gene Transfer of Resistance at Sublethal Concentrations .....	YUAN Qi-yi, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, <i>et al.</i>	(3748)
Impact of Tetracycline Antibiotic on the Transcriptional Expression of Tetracycline Resistance Genes in <i>Shigella flexneri</i> .....	GAO Pin, RUAN Xiao-hui, QIU Wen-jie, <i>et al.</i>	(3758)
Competitive Selection of Hydroxylamine on Ammonia Oxidizing Bacteria and Nitrite Oxidizing Bacteria .....	QIAO Xin, WANG Bo, GUO Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(3765)
Analysis of the Effect of Temperature on the Microbial Flora Structure During the Nitrite Oxidation Process Using 16S rRNA High-throughput Sequencing .....	HOU Xiao-wei, NIU Yong-jian, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(3773)
Universality and Potential Application of Mn(II) Oxidation Triggered by Microbial Interspecies Interactions .....	NING Xue, LIANG Jin-song, BAI Yao-hui, <i>et al.</i>	(3781)
Distribution and Potential Nitrification Rates of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Surface Sediments of Mangrove in Sanya River .....	LUO Qing, ZHEN Yu, PENG Zong-bo, <i>et al.</i>	(3787)
Effects of Ozone Pollution on Growth, Yields, and Mineral Metallic Element Contents of Paddy Rice .....	FANG Xiao-kun, LUO Xiao-san, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(3797)
Short Term Effects of a Changing Carbon Input on the Soil Respiration of <i>Picea schrenkiana</i> Forests in the Tianshan Mountains, Xinjiang .....	SHAO Kang, GONG Lu, HE Xue-min, <i>et al.</i>	(3804)
Effects of the Combined Application of Organic and Inorganic fertilizers on N <sub>2</sub> O Emissions from Saline Soil .....	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, GUO Jia-wei, <i>et al.</i>	(3811)
Mechanism and Influencing Factors of Increasing Soil Temperature by <i>in-situ</i> Electrical Resistance Heating .....	GE Song, MENG Xian-rong, XU Wei, <i>et al.</i>	(3822)
Acid Mine Wasteland Reclamation by <i>Juncus ochraceus</i> Buchen as a Potential Pioneer Plant .....	HUANG Jian-hong, FU Jiang-li, YAN Xin-rui, <i>et al.</i>	(3829)
Effects of Drip Irrigation Patterns and Biochar Addition on Soil Mineral Nitrogen and Microbial Regulation of Greenhouse .....	CAI Jiu-mao, LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, <i>et al.</i>	(3836)
Effects of Cotton Stalk Biochar on the Structure and Function of Fungi Community in Alkaline Rhizosphere Soil of Rice Under Cadmium Pollution .....	LIU Shi-dou, HAN Yao-guang, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i>	(3846)
Effects of Different Treatments with Water Management Combined with Leaf Spraying Silicon Fertilizer on Cd Accumulation in Rice .....	WEI Bin-yun, ZHOU Hang, LIU Jia-wei, <i>et al.</i>	(3855)
Effects of Chelate GLDA on the Remediation of Cadmium Contaminated Farmland by <i>Pennisetum purpureum</i> Schum .....	QIN Jian-jun, TANG Sheng-shuang, JIANG Kai, <i>et al.</i>	(3862)
Situation Analysis and Trend Prediction of the Prevention and Control Technologies for Planting Non-Point Source Pollution .....	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, LI Hong-na, <i>et al.</i>	(3870)